

ÁGATA ISA COTRIM GASPARINI

**ESTUDO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS EM OPERAÇÃO NA BAIXADA SANTISTA – SP**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de  
São Paulo para a obtenção do título de Bacharela em  
Engenharia Ambiental

**SANTOS**

**2019**

ÁGATA ISA COTRIM GASPARINI

**ESTUDO DO DESEMPENHO ENERGÉTICO DE SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS EM OPERAÇÃO NA BAIXADA SANTISTA – SP**

Trabalho apresentado à Universidade Federal de  
São Paulo para a obtenção do título de Bacharela em  
Engenharia Ambiental

Orientador:  
Dr. Fernando Ramos Martins

**SANTOS**

**2019**

*Seja a mudança que você quer ver no mundo. – Mahatma Gandhi*

## **Agradecimentos**

A Deus por me proporcionar saúde e perseverança durante toda a minha vida.

Ao meu orientador Dr. Fernando Ramos Martins por me manter motivada durante a minha graduação, por ter sido paciente e ter estado sempre presente para indicar qual caminho eu deveria seguir.

Ao meu pai por acreditar em mim e por ter feito tudo que estivesse ao seu alcance para que este momento chegasse.

A minha mãe por ter cuidado tão bem de mim, da minha família e do meu projeto.

Ao meu irmão por ter ouvido e vivido comigo todos os meus medos, por ter sido tão amigo e sensível.

Aos meus tios que sempre torceram por mim.

Aos amigos que estiveram ao meu lado nos estudos e nos momentos de descontração.

Ao Dr. Francisco José Lopes de Lima e a empresa Alva Engenharia que disponibilizaram materiais fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

A todos os docentes que contribuíram para a minha formação profissional e crescimento pessoal.

Àqueles que passaram por mim e deixaram lindas memórias e grandes lições.

## **Resumo**

A energia solar é a fonte de energia renovável mais abundante em nosso planeta. Com o crescimento da demanda de energia em razão do desenvolvimento socioeconômico e do avanço tecnológico, a energia solar torna-se uma alternativa de baixo impacto ambiental para suprir essa demanda de energia e complementar às plantas de geração de eletricidade em operação com uso de outros recursos energéticos. Se por um lado implantar energia solar parece algo tão promissor, por outro, ainda é pouco explorado no Brasil. A escassez de informações confiáveis e a baixa disseminação do conhecimento básico sobre o aproveitamento do recurso solar tem sido uma das barreiras para o crescimento do mercado da geração solar. O presente trabalho procura contribuir com a produção de conhecimento no setor por meio da avaliação de parâmetros técnicos de desempenho de instalações fotovoltaicas conectadas à rede. O estudo utiliza informações meteorológicas disponibilizadas por centros de referência internacional para estimar o recurso solar disponível para a geração e compara com os dados reais de geração registrados em sete plantas em operação na região metropolitana da Baixada Santista. Apesar dessas plantas estarem na mesma região, sujeitas a irradiâncias muito parecidas e serem da mesma empresa fabricante, os resultados mostram desempenhos distintos.

**Palavras chave:** Energia; solar; instalação; fotovoltaica; desempenho.

## **Abstract**

Solar energy is the most abundant renewable energy source on our planet. The energy demand increases as a result of socio-economic development and technological advancement. The solar energy resource presents low environmental impact alternative and it can contribute to complement the electricity power plants in operation based on other energy resources. If, on the one hand, implanting solar energy seems so promising, on the other, it is still little explored in Brazil. The scarcity of reliable information and the low dissemination of basic knowledge about the solar resource and technologies has been one of the barriers to the growth of the solar generation market. The present work aims at evaluating the technical performance parameters of grid connected photovoltaic installations to reduce the market barriers. The study used meteorological data provided by international reference centers to estimate the solar resource available for power generation and compares with the actual generation data recorded in seven plants operating in the Baixada Santista metropolitan region. Although these solar power plants are very close to each other, subject to very similar irradiance, and were manufactured by the same company, the results show different performances.

**Keywords:** Energy; solar; installation; photovoltaic; performance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática dos processos radioativos que ocorrem na atmosfera .....	12
Figura 2 – Sistema fotovoltaico completo (armazenamento simples).....	16
Figura 3 – Imagem aérea da localização dos sistemas fotovoltaicos utilizados no estudo .....	18
Figura 4 – Imagem aérea do sistema P04 .....	19
Figura 5 – Imagem aérea do sistema P03 .....	20
Figura 6 – Imagem aérea do sistema P02 .....	20
Figura 7 – Imagem aérea do sistema P08 .....	21
Figura 8 – Imagem aérea do sistema P10 .....	21
Figura 9 – Imagem aérea do sistema P07 .....	22
Figura 10 – Imagem aérea do sistema P06 .....	22
Gráfico 1 – Resultados da Produtividade Anual de cada instalação .....	26
Gráfico 2 – Resultados da Energia Anual Estimada de cada instalação .....	27
Gráfico 3 – Resultados de Desempenho Global de cada instalação.....	28
Gráfico 4 – Resultados da Eficiência Energética de quatro instalações.....	29
Gráfico 5 – Resultados da Eficiência Energética de duas instalações.....	30
Quadro 1 – Monitoramento instantâneo das sete instalações .....	30

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Conceitos e grandezas importantes na área de energia solar .....	13
Tabela 2 – Dados da NOS dos picos de demanda entre 2006 e 2013 .....	17
Tabela 3 – Dados considerados para a determinação dos índices de mérito .....	23



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>08</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>18</b>
1	Área de Estudo .....	18
2	Dados Técnicos .....	23
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>33</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>35</b>

## 1. Introdução

A escolha das fontes de energia deve levar em consideração as demandas sociais, as restrições ambientais, a competitividade econômica, a segurança energética e outras características regionais e locais de interesse. Estudos mostram que impactos ambientais como enchentes, secas, variações notáveis na temperatura atmosférica e algumas doenças, principalmente diarreia, desnutrição e malária, podem ser associados à queima de combustíveis fósseis (Muneer et al., 2006). Estima-se que as alterações do clima podem levar a cerca de 250000 mortes adicionais por ano entre 2030 e 2050, segundo a Organização Mundial da Saúde (OMS, 2014). Em resumo, o consumo de energia por meio da queima de combustíveis acarreta impactos relevantes à qualidade ambiental e ao bem-estar humano, e a busca de alternativas para a diversificação das fontes de energia com aproveitamento de recursos renováveis, em conjunto com crescimento da eficiência energética e o consumo consciente de energia, é essencial para a busca de um desenvolvimento econômico sustentável ambientalmente e socialmente referenciado.

No Brasil, a demanda de eletricidade é atendida principalmente pelo recurso hidroelétrico, cerca de 63% segundo a ANEEL (2019). Esta centralização da matriz é um modelo também insustentável a longo prazo, uma vez que a demanda de energia aumenta com o crescimento socioeconômico (Castro et al, 2010). Pereira et al. (2004) acredita que investir em barragens para a construção de usinas hidrelétricas, usinas termelétricas convencionais ou nucleares acaba sendo necessário para o suprimento da demandada energética; e que a construção dessas usinas desmata grandes áreas, prejudicando a fauna e a flora. Diante de tal limitação, uma alternativa para suprir a demanda crescente é o complemento das plantas de geração de eletricidade já existentes com outras que utilizam fontes renováveis de energia, como a solar e eólica.

A energia solar, apesar de ainda contribuir pouco para a matriz energética mundial quando comparado às demais fontes renováveis e convencionais, é uma opção promissora para aplicações térmica e fotovoltaica porque reduz o impacto ambiental associado ao consumo de energia - já que são alternativas livres de emissão de CO<sub>2</sub> nos processos de conversão para energia elétrica ou mecânica (Goldemberg e Lucon, 2007).

O Sol é a principal fonte de energia para o planeta e todas as demais fontes estão diretamente ou indiretamente relacionadas a ele. A energia solar é renovável e abundante,

com potencial para atender a demanda crescente de energia próximo aos centros consumidores.

O aproveitamento da energia solar pode ser realizado por meio de duas tecnologias distintas: o aproveitamento térmico e a conversão fotovoltaica. O Brasil é um bom candidato à implementação de sistemas fotovoltaicos, porque os valores anuais de irradiação solar na superfície são menores apenas que os encontrados nas regiões desérticas das Américas do Norte e do Sul, norte da África, Oriente Médio, China e Austrália (Vichi, Mansor, 2009). O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em colaboração com Universidades Federais vem trabalhando em projetos e atividades para a geração de uma base de dados de disponibilidade e variabilidade do recurso de energia solar no território brasileiro (Pereira et al., 2006). Sistemas fotovoltaicos convertem a radiação solar incidente em eletricidade a partir de materiais semicondutores, como Silício entre outros (Vichi, Mansor, 2009).

Para uso doméstico, a fonte ainda é pouco explorada, mas parece ser uma boa alternativa para condomínios residenciais porque possibilita atender parte da demanda de eletricidade das residências, bem como: climatizar a parte interna, substituir total ou parcialmente chuveiros elétricos; iluminação natural – tardando assim o acender das luzes e até contribuindo com a jardinagem local (Brito, Silva, 2006). O aproveitamento da energia solar para processos industriais tem sido tradicionalmente um campo experimental, mas cada vez mais projetos estão sendo implementados e entrando em operação.

Além do seu uso industrial e doméstico, o recurso energético solar pode ser aproveitado também no setor comercial e nos serviços públicos. O retorno econômico do investimento em conversão fotovoltaica para atender uma demanda específica pode variar conforme o consumo de eletricidade da instalação, o preço da eletricidade comercializada pelas concessionárias de energia, a renda per capita da sociedade, entre outros fatores.

## **2. Objetivo**

Sabendo do potencial energético solar e das inúmeras possibilidades de aproveitamento deste recurso energético, este trabalho tem como objetivo o estudo do comportamento de sistemas fotovoltaicos em operação na Baixada Santista. O estudo avalia a produtividade e desempenho de instalações fotovoltaicas através do monitoramento de índices de mérito alcançados pelos sistemas em condições operacionais em uma região costeira sujeitas a diversos fatores que podem afetar o desempenho dos sistemas, como a operação em ambiente com temperaturas elevadas, grande concentração de particulados no ar devido às operações portuárias a atividades industriais e comerciais na região. O estudo compara os valores alcançados com informações e dados publicados na literatura técnica científica para outras localidades.

### 3. Fundamentação Teórica

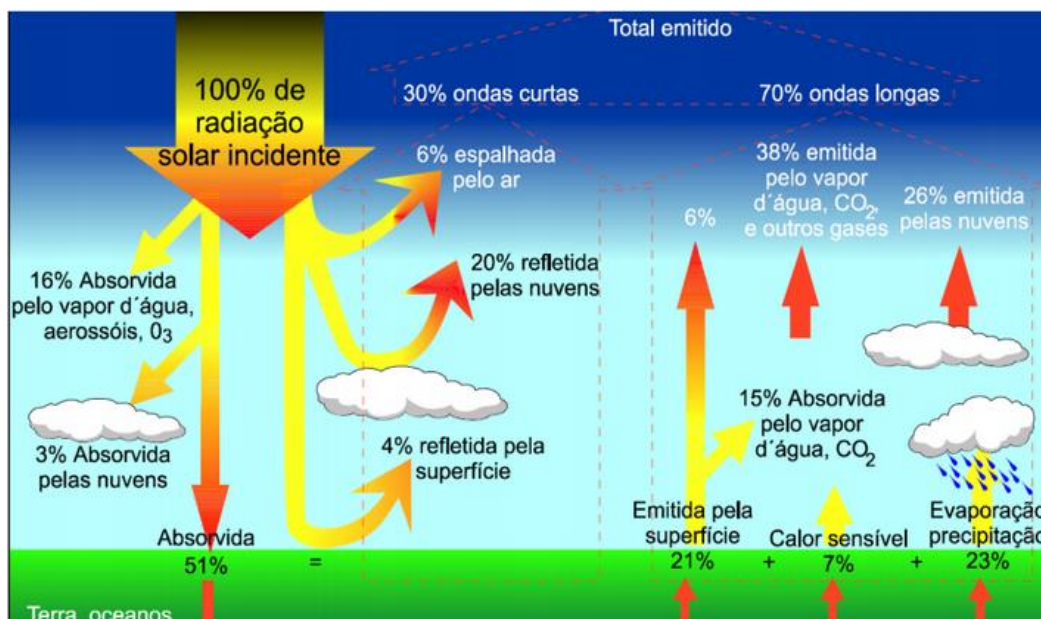
A energia solar é proveniente do Sol e atinge boa parte da superfície terrestre sendo útil em várias aplicações, desde a fotossíntese que é um processo natural até gerar portadores de carga elétrica numa célula fotovoltaica.

Para o aproveitamento da energia solar, consideramos a irradiação global horizontal como um parâmetro decisivo na escolha do lugar para a instalação do sistema fotovoltaico. A irradiação solar é o fluxo de radiação solar incidente em um determinado área medida em  $\text{J/m}^2$  ou  $\text{kWh/m}^2$ . A irradiância solar global é uma grandeza que expressa o fluxo de potência por unidade de área em unidades de  $\text{W/m}^2$ .

A radiação solar é também chamada de radiação de ondas curtas, pois apresenta ondas eletromagnéticas com comprimentos de onda entre zero a quatro micrometros. A radiação solar que chega à superfície da Terra é absorvida e parte dela refletida para o espaço. A radiação terrestre - que é a energia emitida pela Terra para atmosfera – é chamada de radiação de onda longa porque apresenta comprimentos de onda superiores a quatro micrometros. Porém, nem toda radiação que o Sol emite chega à superfície terrestre. As ondas são parcialmente absorvidas ou espalhadas por nuvens e compostos gasosos ou particulados presentes na atmosfera. A Figura 1 apresenta uma ilustração dos processos de interação da radiação solar com a atmosfera terrestre e superfície do planeta.

A radiação solar incidente na superfície da Terra é classificada de acordo com o com os processos radiativos que ocorrem na atmosfera. Por isso o conhecimento de algumas definições é fundamental para o desenvolvimento deste trabalho. A Tabela 1 lista os conceitos e grandezas físicas relevantes para o escopo deste trabalho.

Para medir a irradiância solar que chega à superfície usamos um equipamento conhecido por radiômetro. Se a distância entre o radiômetro mais próximo do local de interesse para estudo da disponibilidade de energia solar for maior que 45 km, os dados diários apresentarão baixa representatividade para a localidade (Martins e Pereira, 2011). Neste caso, é necessário que sejam feitas estimativas de irradiância solar na superfície através de modelos estatísticos ou físicos. Os modelos estatísticos e físicos precisam ser validados com dados observados em superfície a fim de determinar incertezas apresentadas pelas estimativas produzidas. Só então os dados trabalhados poderão ser aproveitados para estimativas de aplicação da radiação solar como fonte energética.



**Figura 1:** Representação esquemática dos processos radioativos que ocorrem na atmosfera.

Fonte: Martins *et. al*, 2004.

As duas principais categorias de geração de eletricidade a partir da energia solar são o sistema fotovoltaico e o sistema de geração termo-solar ou heliotérmica. Quando estes são combinados com outros sistemas de conversão de energia para melhor eficiência, são chamados de sistemas híbridos.

A geração fotovoltaica apresenta como principais características a modularidade, baixo ruído, e não produz emissões de resíduos e gases. Estes fatores são fundamentais e agregam valor econômico quando em comparação com tecnologias energéticas mais tradicionais (Denholm e Margolis, 2007).

O efeito fotovoltaico trata da absorção de energia dos fótons da luz solar pela estrutura cristalina da célula fotovoltaica (Brito e Silva, 2006) para a produção de pares de portadores de carga (lacuna-elétron). A energia transportada pelos fótons de radiação solar é transferida para os portadores de carga que ganham a capacidade de movimento, e o elétron passa da camada de valência para a camada de condução do material, gerando corrente elétrica. O nível de produção de eletricidade dos painéis fotovoltaicos não é constante temporalmente, de forma que a geração de eletricidade será maior em dias de irradiação mais intensa, ou seja, com menor nebulosidade.

**Tabela 1:** Conceitos e grandezas importantes na área de energia solar.

<b>Irradiação Solar</b>	A irradiação solar é o fluxo de radiação solar incidente em um determinado área medida em $\text{J/m}^2$ ou $\text{kWh/m}^2$ .
<b>Irradiância Solar</b>	A irradiância solar global é uma grandeza que expressa a irradiação solar por unidade de tempo em unidades de $\text{W/m}^2$ .
<b>Irradiância Solar Difusa</b>	Irradiância incidente numa superfície horizontal que sofre espalhamento por gases ou particulados na atmosfera.
<b>Irradiância Solar Direta</b>	Irradiância solar que incide na superfície do planeta sem sofrer processos radiativos de espalhamento na atmosfera.
<b>Irradiância Solar Global</b>	Soma irradiâncias difusa e direta.
<b>Índice de Transparência Atmosférica</b>	Razão entre irradiância global incidente na superfície e irradiância solar no topo da atmosfera.
<b>Radiação Solar e Terrestre</b>	Energia emitida através de ondas eletromagnéticas de diferentes comprimentos pelo Sol e pela Terra.
<b>Altura Solar</b>	Ângulo complementar ao ângulo zenital.
<b>Ângulo Azimutal</b>	Ângulo entre a projeção da normal à superfície e o meridiano local.
<b>Ângulo Azimutal do Sol</b>	Ângulo formado entre a projeção da radiação solar no plano horizontal com o meridiano do observador.
<b>Ângulo Zenital Solar</b>	Ângulo formado entre a perpendicular à superfície da Terra e a direção do feixe da radiação direta incidente sobre o plano horizontal.
<b>Ângulo de Incidência</b>	Ângulo entre a normal à superfície e a reta determinada pela direção da radiação solar direta. Para uma superfície horizontal, o ângulo de incidência coincide com o ângulo zenital solar.

<b>Ângulo Horário Solar</b>	Descreve o deslocamento angular aparente do Sol devido à rotação da Terra.
<b>Declinação Solar</b>	Representa o ângulo entre o plano do eixo de rotação da Terra e o plano que contém a trajetória da órbita terrestre ao redor do Sol.

As células fotovoltaicas geram uma corrente elétrica típica em curto circuito da ordem de miliampéres e uma tensão de circuito aberto entre 0.5 e 1V que é um valor muito pequeno para a produção de energia. Por isso, os módulos fotovoltaicos são em sua maioria montados com conjuntos de 28 a 36 células, gerando tensões maiores, 12V, em condição padrão de iluminação (1000W/m<sup>2</sup> e 25 °C). Os sistemas fotovoltaicos podem ser montados utilizando os painéis em série ou em paralelo, para a obtenção de tensões e correntes adequadas para a demanda energética a ser atendida (Brito e Silva, 2006).

A eficiência de conversão de um sistema fotovoltaico é definida pelo quociente entre a energia elétrica gerada e a energia incidente na superfície da célula. Existe também os chamados Índices de Mérito que nos permitem verificar se um sistema está produzindo energia de forma otimizada. Os Índices de Mérito utilizados com maior frequência são: a Produtividade Anual – apresentada na equação (1) - que relaciona a eletricidade efetivamente gerada com a capacidade instalada do sistema; Energia Estimada – apresentada na equação (2), e o Desempenho Global - apresentado na equação (3) - que é a relação entre o quanto o sistema está produzindo com o quanto de energia fotovoltaica está sendo disponibilizada para o sistema.

$$IF = E_g/P_i \quad (1)$$

onde IF representa a quantidade em horas de energia que o sistema produz eletricidade ao longo do período de um ano (h);  $E_g$  é a quantidade de energia gerada em Wh; e  $P_i$  é a potência nominal do sistema em W.

$$E_e = R \cdot A_m \cdot N_m \cdot N_i \cdot N_{hm} \cdot N_m \quad (2)$$

onde  $E_e$  representa a quantidade de energia estimada em Wh/mês; R é a taxa média de irradiação solar incidente em W/m<sup>2</sup>;  $A_m$  é a área do módulo fotovoltaico em



m<sup>2</sup>; N<sub>m</sub> representa a eficiência do Módulo (%); N<sub>i</sub> é a eficiência do Inversor (%); N<sub>hm</sub> é o número de horas do mês; N<sub>m</sub> representa o número de módulos do arranjo fotovoltaico.

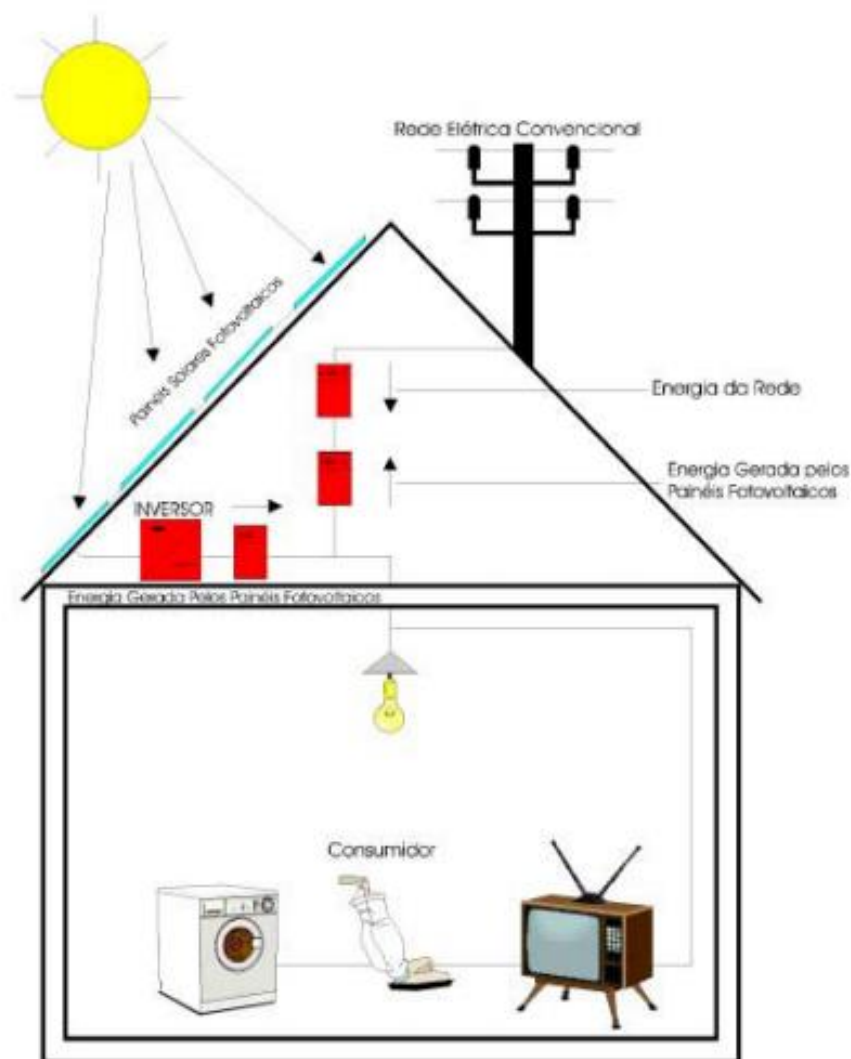
$$PR = E_g * 100 / E_e \quad (3)$$

onde PR representa o desempenho global da instalação (%); E<sub>g</sub> é a energia gerada pelo sistema em um ano (Wh) e E<sub>e</sub> é a energia estimada em um ano (Wh).

Como a energia gerada pelo sistema fotovoltaico é completamente dependente das variações da irradiação solar incidente associadas às condições meteorológicas, um sistema de armazenamento de energia pode ser necessário com uso de baterias ou outra tecnologia adequada em razão das condições locais que se apresentam. Por isso é importante também calcular a eficiência energética - equação (4) - do sistema em condições de operação de modo a identificar condições que requerem o armazenamento de energia. Um sistema fotovoltaico completo está ilustrado na Figura 2.

$$\varepsilon = E_c * 100 / E_g \quad (4)$$

onde  $\varepsilon$  representa a eficiência energética do sistema (%); E<sub>c</sub> é a quantidade de energia consumida em um ano (kWh) pelo usuário; e E<sub>g</sub> representa a quantidade de energia gerada pelo sistema em um ano (Wh).



**Figura 2:** Sistema fotovoltaico completo (armazenamento simples).

Fonte: Renata Pereira Braga, 2008.

Um dos maiores benefícios esperados de um sistema fotovoltaico é a redução dos picos anuais de demanda elétrica nos horários de maior consumo de energia. Os picos de demanda elétrica no Brasil aparecem no período da tarde em razão do consumo de energia para climatização de ambientes (refrigeração) em razão do desconforto térmico provocado por temperaturas elevadas nos períodos da tarde, principalmente nos meses mais quentes, entre novembro e abril, como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Dados da ONS dos picos de demanda entre 2006 e 2013.

Carga de Demanda - MWh/h								
	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
<b>SE/CO</b>	37.721	40.214	40.391	40.519	43.992	44.497	47.162	48.238
Dia/Mês	16/ago	25/abr	11/set	02/dez	26/fev	22/fev	29/fev	05/dez
Hora	19	19	19	16	16	15	16	15
<b>Sul</b>	10.750	11.238	11.423	12.160	13.432	13.687	15.084	15.568
Dia/Mês	17/mar	30/mar	26/mar	04/mar	05/fev	20/dez	10/dez	01/fev
Hora	20	20	20	15	15	15	16	15
<b>SE/CO + S</b>	48.674	50.819	51.329	51.995	56.580	57.466	61.502	62.080
Dia/Mês	26/abr	25/abr	28/mai	01/dez	04/fev	28/jan	08/fev	15/fev
Hora	19	19	19	16	15	15	15	15
<b>Nordeste</b>	8.863	9.245	9.429	9.684	10.137	10.222	10.985	11.703
Dia/Mês	16/dez	27/out	01/nov	12/dez	09/out	24/nov	18/dez	04/dez
Hora	21	20	20	21	19	16	16	16
<b>Norte</b>	3.887	4.019	4.160	4.165	4.409	4.687	4.639	6.045
Dia/Mês	06/dez	17/mai	17/out	19/dez	27/set	22/set	18/abr	17/set
Hora	21	20	20	21	15	15	16	16
<b>NE + N</b>	12.560	13.078	13.387	13.745	14.387	14.693	15.380	17.608
Dia/Mês	07/nov	27/out	01/nov	19/dez	18/mar	24/nov	11/dez	11/dez
Hora	20	20	20	21	15	16	16	16
<b>Sistemas</b>	60.389	62.895	64.215	65.315	70.450	71.133	76.262	78.983
Dia/Mês	26/abr	25/abr	28/mai	01/dez	04/fev	23/dez	08/fev	04/dez
Hora	19	19	19	16	16	15	16	16

Fonte: ONS, 2015.

## 4. Materiais e Métodos

### 4.1 Área de Estudo

A área escolhida para este estudo foi a Região Metropolitana da Baixada Santista que conta com cerca de 2,42 milhões de km<sup>2</sup>. É a 17ª região metropolitana mais populosa do Brasil e recebe tantos turistas no verão que a população pode atingir o dobro da população residente (cerca de 480 mil hab.). A Baixada Santista conta com nove municípios e tem sua economia movimentada por atividades portuárias, industriais, pesqueiras, turísticas, culturais e comerciais. Fazem parte da região municípios como: Cubatão (Parque Industrial), Guarujá, Santos (Complexo Portuário de Santos) e Bertioga, Praia Grande e São Vicente (conhecidos pelo turismo e atividades pesqueiras). Foram utilizados para este estudo, sete sistemas fotovoltaicos conectados à rede em operação em São Vicente, Santos e Guarujá. A Figura 3 apresenta uma imagem aérea da área de estudo.



**Figura 3:** Imagem aérea da localização dos sistemas fotovoltaicos utilizados no estudo.

O primeiro sistema considerado (P04) conta com uma potência nominal de 5.94 kW e um inversor do tipo PHB5000 e está em operação em uma residência no bairro de Aparecida em Santos, SP. O módulo da estação é do tipo jkm330pp-2. A localização geográfica está indicada na Figura 4.



**Figura 4:** Imagem aérea da localização do sistema P04.

O segundo sistema considerado (P03) conta com uma potência nominal de 6.5 kW e um inversor do tipo PHB5000 e está em operação em uma residência na Rua Francisco Xavier dos Passos em São Vicente, SP. O módulo da estação é do tipo jkm325p-72. A localização geográfica está indicada na Figura 5.

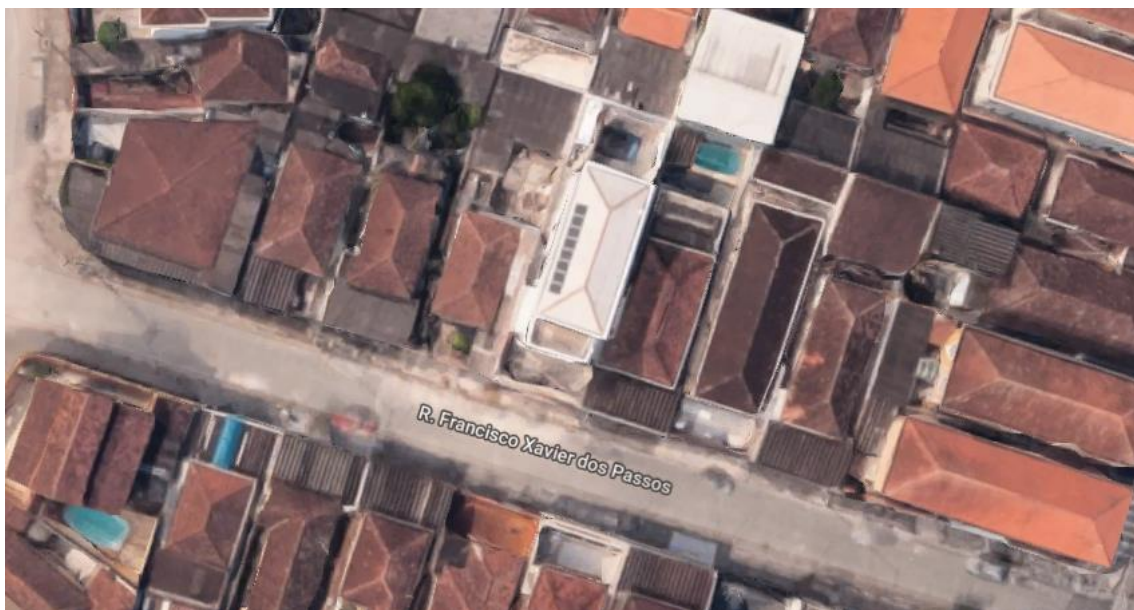
A Figura 6 mostra a localização do terceiro sistema considerado (P02) conta com uma potência nominal 4.5 kW e um inversor do tipo PHB5000 e está em operação na rua Praça Estado de Israel na Vila São José em Santos, SP. O módulo da estação é do tipo jkm325p-72.

A Figura 7 mostra o local onde o quarto sistema considerado (P08) opera com uma potência nominal de 6.6 kW e um inversor do tipo PHB5000 e está em operação na Avenida Varaneio, Guarujá, SP. O módulo da estação é do tipo jkm330pp-2.

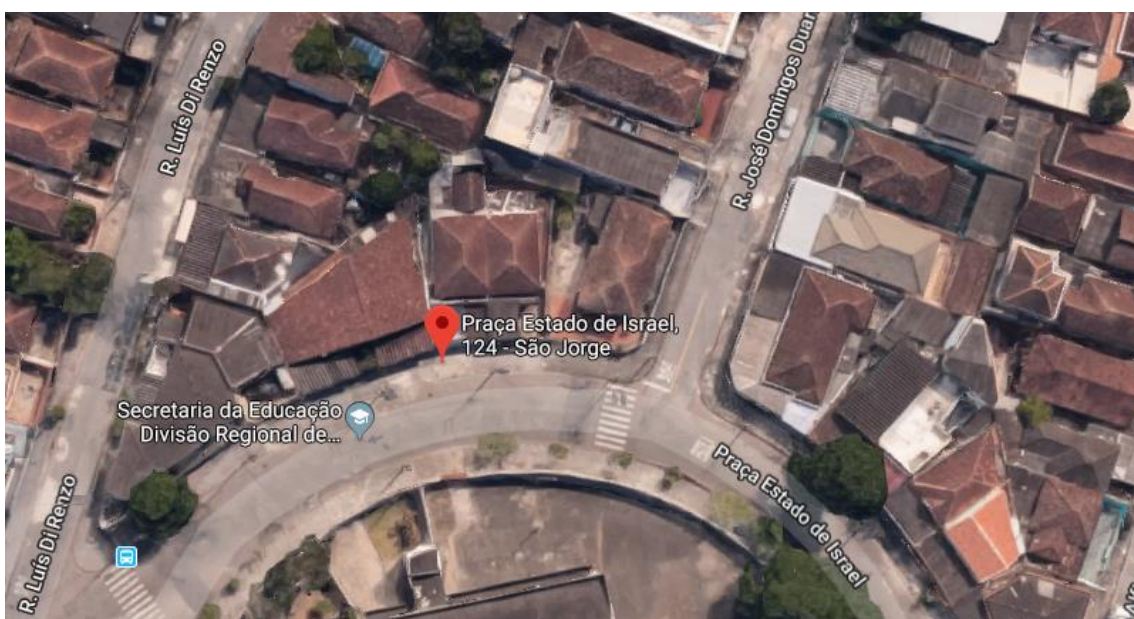
O quinto sistema (P10) conta com uma potência nominal de 4.6 kW e um inversor do tipo PHB5000. Está em operação na rua Cotovia em Tupy, Itanhaém, SP como mostra a Figura 8. O módulo da estação é do tipo jkm330pp-2.

O sexto sistema considerado (P07) conta com uma potência nominal de 10 kW e dois inversores do tipo PHB5000. O sistema está em operação na Avenida Miguel Afonso Gonzales no bairro de Astúrias, Guarujá, SP conforme a Figura 9. O módulo da estação é do tipo jkm330pp-2.

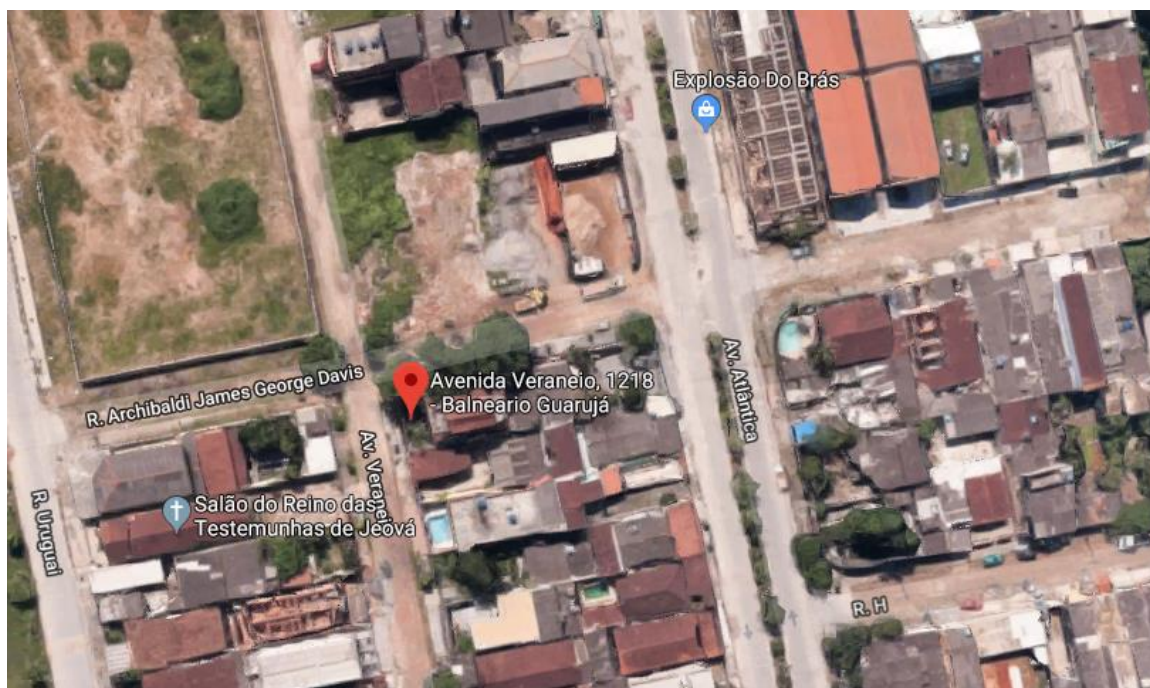




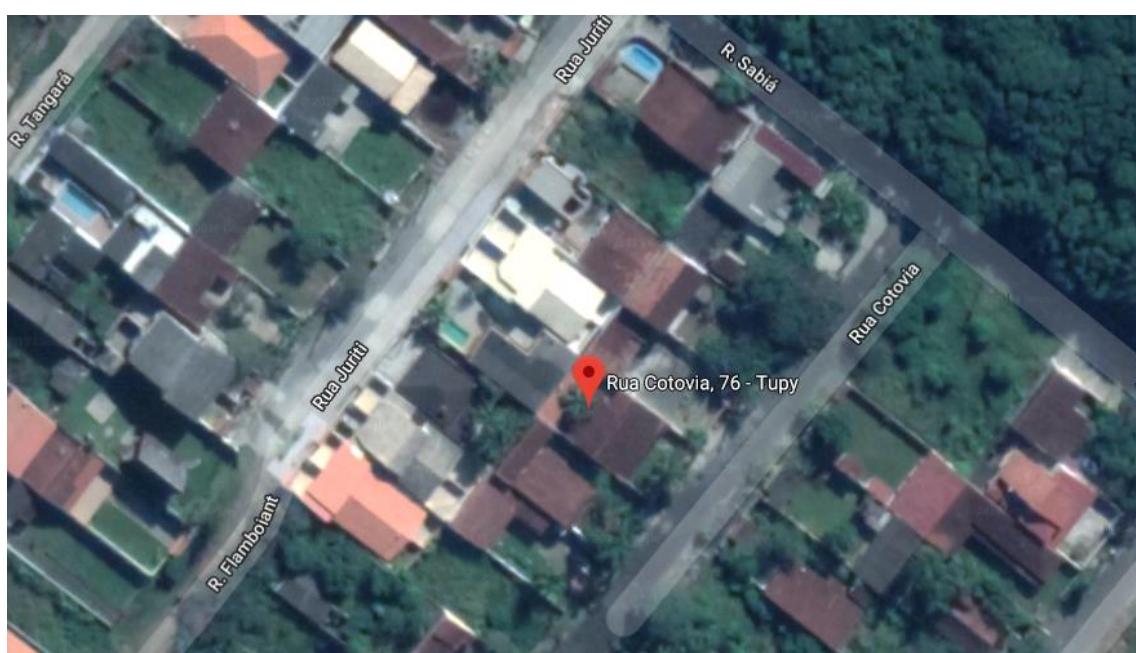
**Figura 5:** Imagem aérea da localização da instalação P03.



**Figura 6:** Imagem aérea da localização da instalação P02.

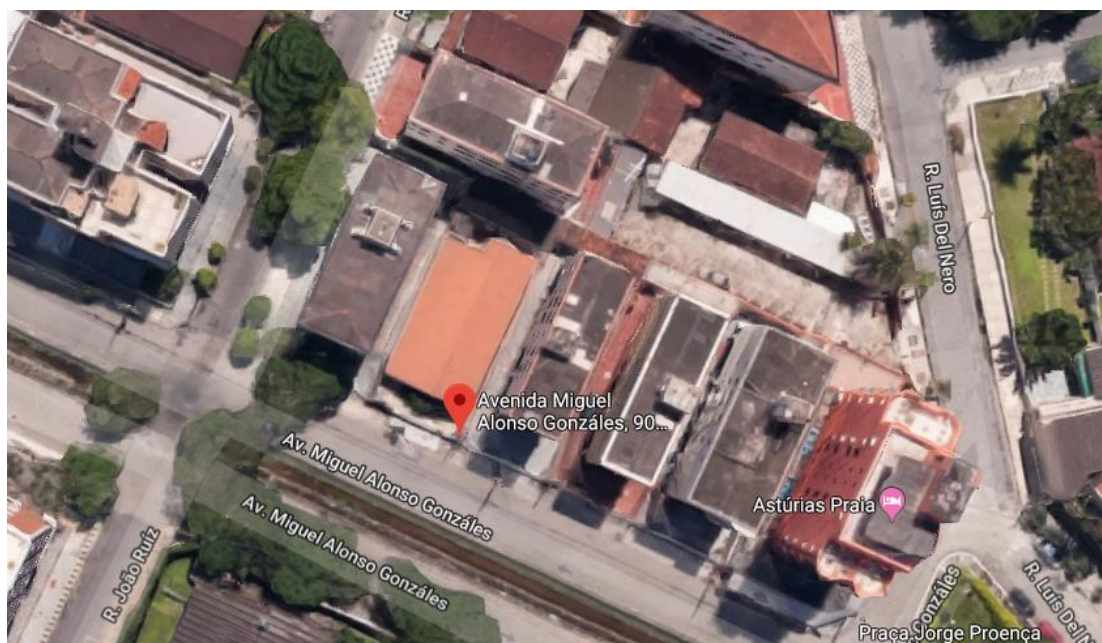


**Figura 7:** Imagem aérea da localização da instalação P08.



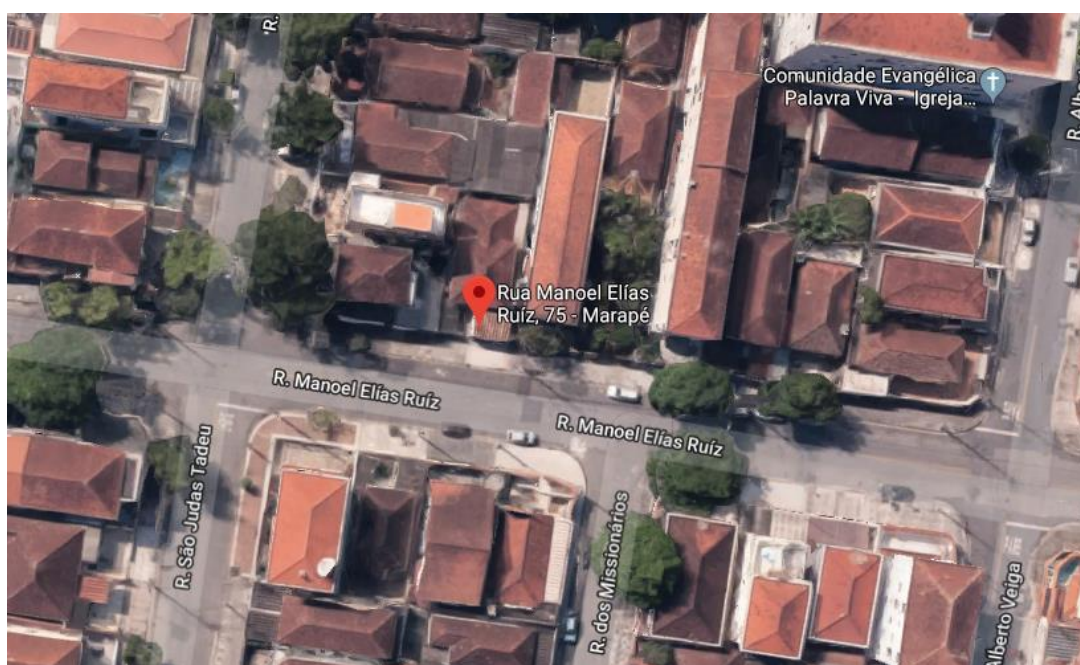
**Figura 8:** Imagem aérea da localização da instalação P10.





**Figura 9:** Imagem aérea da localização da instalação P07.

O sétimo sistema considerado (P06) conta com uma potência nominal de 10.56 kW e dois inversores do tipo PHB5000 e está em operação na rua Manoel Elias Ruiz, Marapé em Santos, SP (Figura 10). O módulo da estação é do tipo jkm330pp-2.



**Figura 10:** Imagem aérea da localização da instalação P06.



## 4.2 Dados Técnicos

A empresa Alva Engenharia contribuiu diretamente com o desenvolvimento deste projeto disponibilizando os dados técnicos das instalações que foram imprescindíveis para a análise comparativa. Os dados foram utilizados para calcular os índices de mérito e a eficiência energética que serão apresentados um pouco mais adiante. A Alva Engenharia avalia, instala, desenvolve e monitora as estações através da tecnologia brasileira PHB Solar. Os dados técnicos de cada estação serão apresentados na tabela abaixo.

**Tabela 3:** Dados considerados para a determinação dos índices de mérito.

Planta	Capacidade (W)	Energia Produzida (kWh)	Data de Instalação	Nº de Painéis	Área Módulo (m²)	Efic. Módulo (%)	Efic. Inversor (%)
P04	5904	5128,8	27/07/2018	18	1,94	17,01	97,8
P03	6500	7895,3	12/02/2018	20	1,94	16,75	97,8
P02	4500	5038,3	13/11/2017	14	1,94	16,75	97,8
P08	6600	25158,2	03/04/2019	20	1,94	17,01	97,8
P10	4620	3783.5	16/04/2019	14	1,94	17,01	97,8
P07	10000	8654.6	17/03/2019	32	1,94	17,01	97,8
P06	10560	8906.0	20/01/2019	32	1,94	17,01	97,8

Na engenharia usamos alguns indicadores para facilitar a comparação de desempenho entre sistemas fotovoltaicos. Tais indicadores usados na engenharia são conhecidos como índices de mérito. Esses índices permitem verificar se o sistema está produzindo energia fotovoltaica de forma otimizada ou se deve ser reconfigurado para melhor aproveitamento do recurso solar disponível (Mello, 2016).

No caso do estudo presente consideramos as sete instalações apresentadas na tabela três operando em configurações e condições de instalação diferentes. No entanto, por estarem operando em localidades próximas, distância da ordem de uma dezena de quilômetros, a mesma taxa de irradiação global incidente foi assumida para todos sistemas a 46,3° Oeste e 23,9° Sul.

Os índices de mérito utilizados no estudo foram a produtividade anual (1), energia estimada (2), desempenho global (3) e eficiência energética (4).

A produtividade anual é a razão entre a energia gerada pelo sistema e sua potência e pode ser calculada com uso da equação (1).

$$IF = E_g/P_i \quad (1)$$

Esta razão nos permite avaliar e comparar sistemas de diferentes tamanhos quando instalados sob a mesma irradiação (Marion et Al., 2005).

Para o cálculo do desempenho global (equação 3) foram definidas algumas variáveis, dentre elas a quantidade de energia estimada, representada pela equação (2), a partir das especificações – eficiência do módulo e inversor - fornecidas pelo fabricante dos painéis e do inversor (PhB), juntamente aos dados de irradiação obtidos na reanálise via satélite disponíveis na plataforma NCAR RDA (Research Data Archive) em “ncep climate forecast system version 2 (cfsv2) selected hourly time series products” referentes a latitude e longitude das plantas fotovoltaicas fornecidas pela empresa Alva Engenharia, que também nos forneceu a área de cada módulo.

A energia estimada é calculada a partir da equação (2).

$$E_e = R * A_m * N_m * N_i * N_{hm} * N_m \quad (2)$$

Para a análise consideramos a soma de doze meses completos de energia mensal estimada a fim de comparar a energia estimada para um ano de cada sistema.

O desempenho global é a razão entre o desempenho real e o desempenho teórico possível do sistema. Tal índice tem envolvimento direto com a eficiência do inversor, resposta espectral, sujeira e sombreamento (Marion et Al., 2005). O desempenho global é determinado com uso da equação (3).

$$PR = E_g * 100 / E_e \quad (3)$$

A eficiência energética fornece uma avaliação sobre a fração da energia gerada pelo sistema fotovoltaico é aproveitada pelo usuário. A determinação da eficiência energética é possível com uso da equação (4).

$$\varepsilon = E_c * 100 / E_g \quad (4)$$

Para avaliar o desempenho consideramos os dados de um período de um ano completo julho de 2018 a julho de 2019, como precisávamos de um ano de dados para o desenvolvimento do trabalho e a P04 foi instalada em 27 de julho de 2018, escolhemos a data de instalação dela como ponto de partida para todas as outras instalações. Para o cálculo de energia estimada consideramos, portanto, a radiação de um mês cheio a partir de agosto de 2018.

A produção e a capacidade de produção energética estão diretamente relacionadas a capacidade de potência instalada e o quanto dessa potência a planta consegue realizar. Para ter ciência desses valores os registros diários foram acompanhados na plataforma de monitoramento do inversor da PhB, que também fornece os demais dados técnicos considerados para estimar a produção energética.

Depois de separar todas as informações foi calculado os índices de mérito dos sete sistemas fotovoltaicos instalados na Baixada Santista.

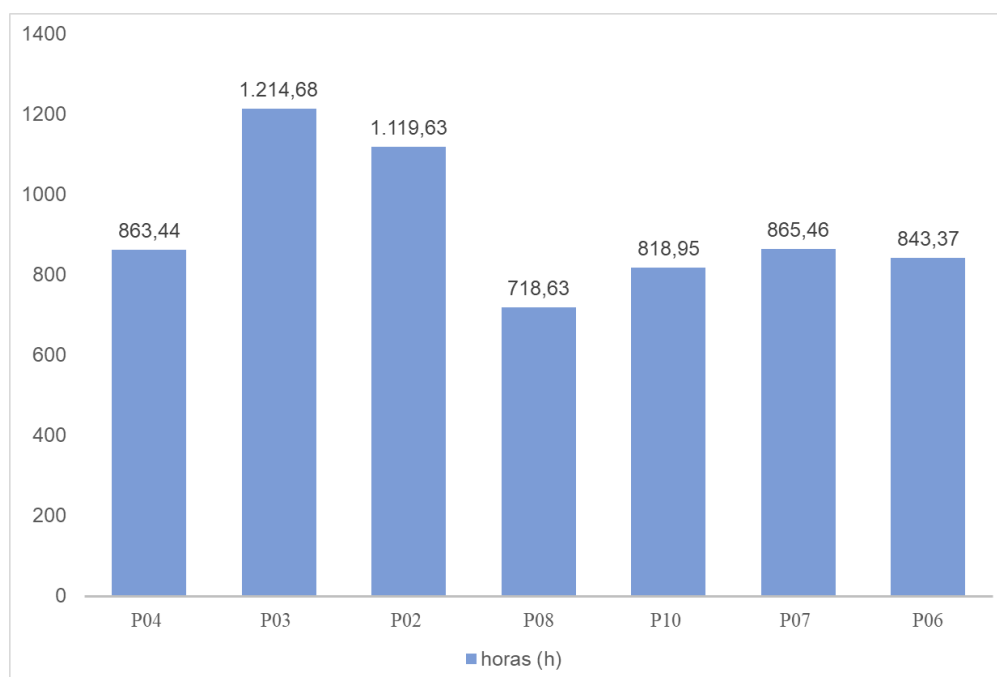
## 5. Resultados e Discussão

Neste capítulo apresentamos os resultados alcançados para os índices de mérito das sete plantas fotovoltaicas em operação na área de estudo. O Gráfico 1 mostra a quantidade de energia em horas que cada sistema produziu em um ano.

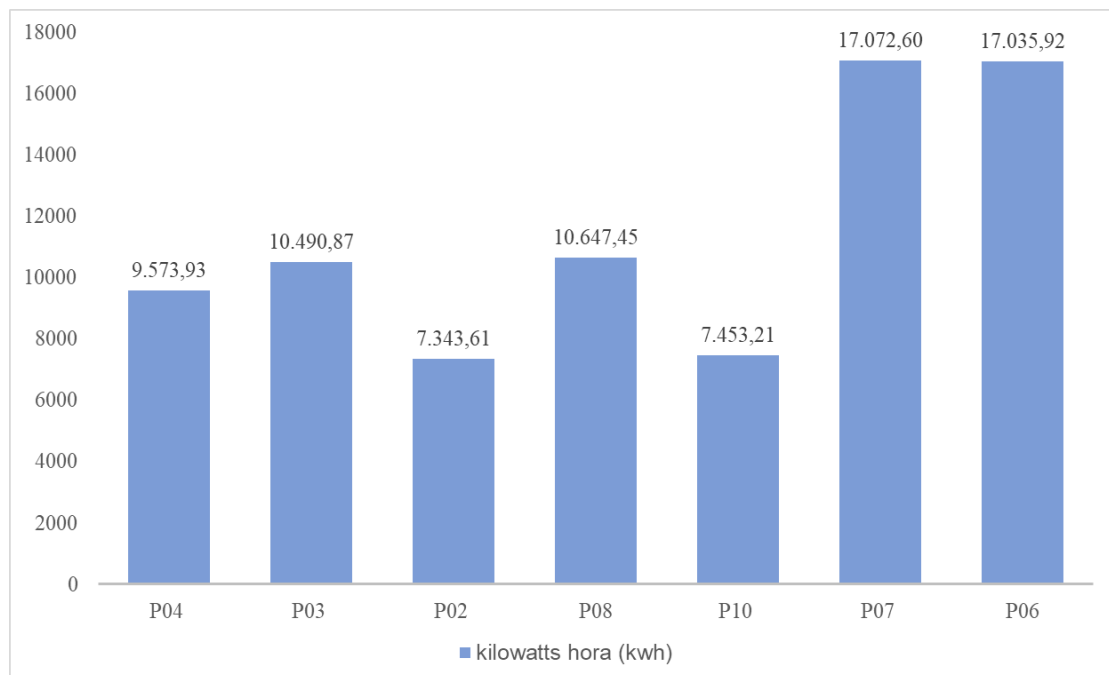
Notamos que apesar das instalações serem próximas umas às outras, a produtividade anual apresentou valores consideravelmente distintos, principalmente em P03 e P02. Isso pode ser explicado pela produtividade ser a relação entre a capacidade do sistema e a energia que é produzida em um ano e notamos que quando acompanhado o monitoramento das instalações em tempo real, P03 e P02 apresentaram as melhores produções de energia dentre as demais instalações. Além disso observamos nas imagens aéreas que os sistemas foram instalados em áreas de baixo sombreamento (ruas largas e prédios mais baixos).

Como as instalações contam com o mesmo fabricante dos inversores e módulos de silício policristalino - e estão em uma mesma região (onde receberiam praticamente a mesma média de irradiação solar), as quantidades de energia distintas podem ser justificadas provavelmente por diferenças de sombreamento local ou ocorrência de maior presença de particulados no ar.

**Gráfico 1:** Resultados da Produtividade Anual de cada instalação.

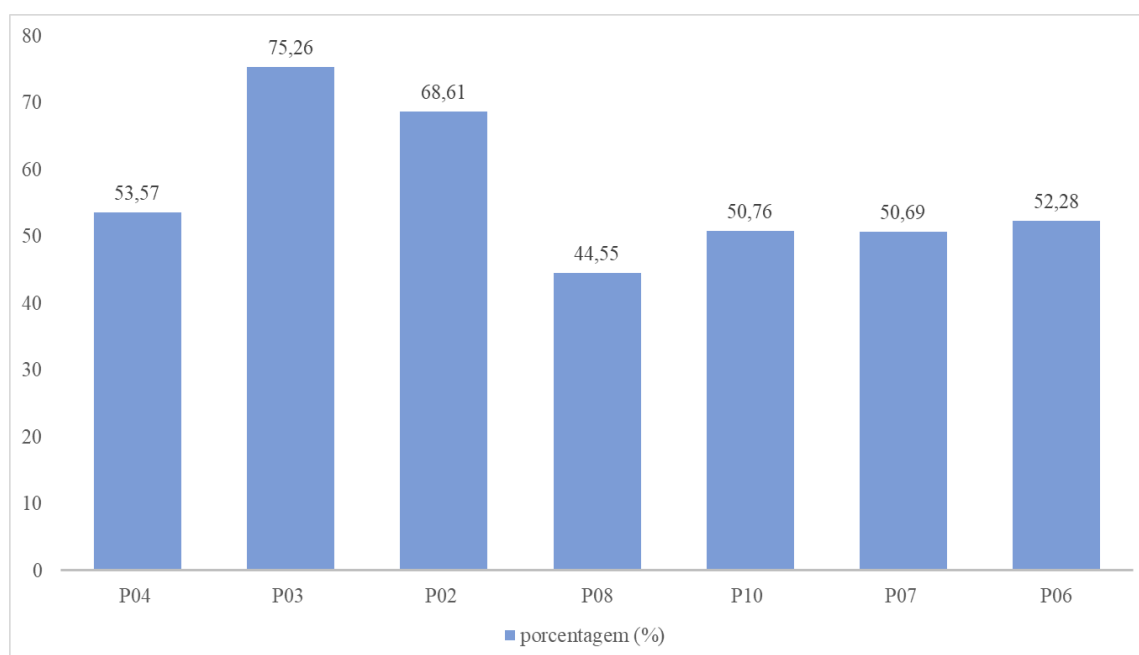


**Gráfico 2:** Resultados da Energia Anual Estimada de cada instalação



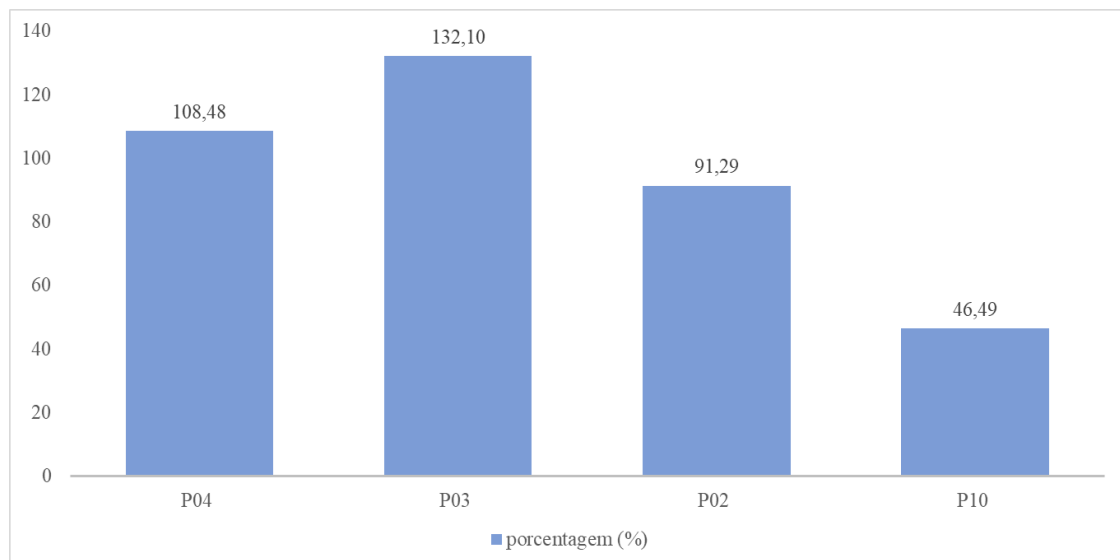
Para calcular a Energia Estimada utilizamos os dados de irradiação solar disponíveis em bases de dados de reanálise meteorológica. Os registros de irradiação solar estão em resolução horária. Para obter a energia estimada de um ano, somamos a energia média estimada de doze meses. Esse valor além de ser importantíssimo para calcular o índice de desempenho, por si só já nos indica onde podemos encontrar maior produção energética dentre as sete instalações em estudo. O resultado (vide Gráfico 2) era esperado uma vez que os maiores valores de energia estimada se encontram na P07 e P06 em razão do fato que capacidade instalada destes sistemas é de até 10 kW com 32 módulos fotovoltaicos. As demais plantas apresentam capacidades instaladas que variam entre 4 kW e 6 kW de potência com 14 a 20 painéis.

**Gráfico 3:** Resultados do Desempenho Global de cada instalação.



O desempenho global mostra a relação entre a energia que o sistema gerou pela energia que era esperado que ele gerasse em um ano. P03 e P02 (vide Gráfico 3) apareceram de novo como os mais bem avaliados. Os demais sistemas variaram próximos aos 50% de desempenho, que é uma média boa para a Baixada Santista considerando que é uma região com grande quantidade de edifícios residenciais e comerciais altos e provocam sombreamento nos sistemas nos horários em que o ângulo zenital solar é mais elevado (início e fim do dia e períodos de outono e inverno).

**Gráfico 4:** Resultados da Eficiência Energética de quatro instalações.

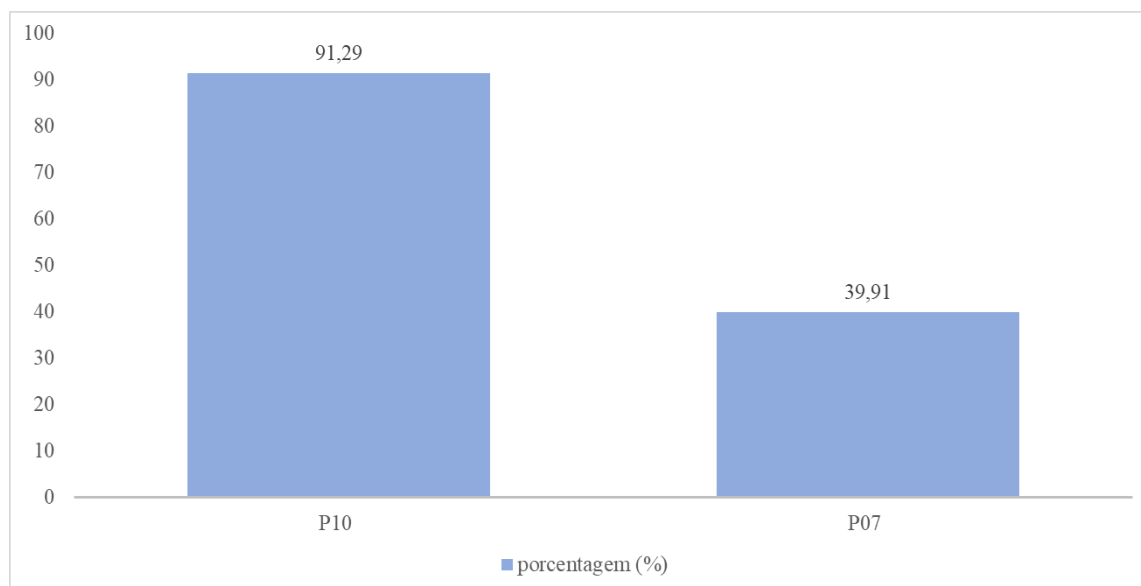


Foram calculados todos os índices de mérito discutidos na metodologia para todos os sistemas fotovoltaicos, mas para a eficiência energética os resultados foram divididos em dois gráficos, e duas estações foram desconsideradas em ambos por falta de informação ou pela discussão do resultado não caber em questão.

Depois de analisar as quatro estações apresentadas no Gráfico 4, pode-se dizer que a P03 tem o maior aproveitamento energético dentre as plantas em operação comparadas no estudo, isso é, o proprietário da estação P03 é quem mais consome o que o sistema produz.

A fim de comparar uma situação de sistemas fotovoltaicos onde os proprietários consumiriam a mesma quantidade de energia, P10 e P07, foi estipulado um consumo para cada mês de ambas estações simultaneamente, esperando que a eficiência energética pudesse ser a mesma por serem instalações com materiais do mesmo fabricante, estarem sob a mesma irradiação solar. Analisando o Gráfico 5, pode-se observar que o proprietário da estação P10 tem um aproveitamento maior da energia produzida do que o proprietário da estação P07, isso porque a estação P07 tem quase duas vezes mais a capacidade de produzir energia em comparação à estação P10.































**Gráfico 5:** Resultados da Eficiência Energética de duas instalações simulando o mesmo consumo energético.



**Quadro 1:** Monitoramento instantâneo das sete instalações

 <p>Data de Criação: 2018/07/27</p>	 <p>Capacidade Instalada: <b>5.940 kW</b> Potência Instantânea: <b>0.567 kW</b></p>	 <p>E-Dia: <b>3.2 kWh</b> E-Total: <b>6.8 MWh</b></p>	 <p>Lucro Diário: <b>R2.50</b> Rendimento Total: <b>R5261.26</b></p>	 <p>Diário Evitado: <b>0.001 ton</b> Total Evitado: <b>3.070 ton</b></p>	 <p>Planta Diária: <b>0.010 arvores</b> Planta Total: <b>20.236 arvores</b></p>
 <p>Data de Criação: 2019/01/20</p>	 <p>Capacidade Instalada: <b>10.560 kW</b> Potência Instantânea: <b>0.562 kW</b></p>	 <p>E-Dia: <b>21.3 kWh</b> E-Total: <b>6.1 MWh</b></p>	 <p>Lucro Diário: <b>R16.61</b> Rendimento Total: <b>R4792.55</b></p>	 <p>Diário Evitado: <b>0.010 ton</b> Total Evitado: <b>2.800 ton</b></p>	 <p>Planta Diária: <b>0.064 arvores</b> Planta Total: <b>18.433 arvores</b></p>



 Data de Criação: 2019/04/16	 Capacidade Instalada: <b>4.620 kW</b> Potência Instantânea: <b>0.582 kW</b>	 E-Dia: <b>16.4 kWh</b> E-Total: <b>1.7 MWh</b>	 Lucro Diário: <b>R12.79</b> Rendimento Total: <b>R1329.59</b>	 Diário Evitado: <b>0.007 ton</b> Total Evitado: <b>0.780 ton</b>	 Planta Diária: <b>0.049 arvores</b> Planta Total: <b>5.114 arvores</b>
 Data de Criação: 2019/03/17	 Capacidade Instalada: <b>10.000 kW</b> Potência Instantânea: <b>9.749 kW</b>	 E-Dia: <b>21.7 kWh</b> E-Total: <b>4.6 MWh</b>	 Lucro Diário: <b>R16.93</b> Rendimento Total: <b>R3605.55</b>	 Diário Evitado: <b>0.010 ton</b> Total Evitado: <b>2.100 ton</b>	 Planta Diária: <b>0.065 arvores</b> Planta Total: <b>13.868 arvores</b>
 Data de Criação: 2017/11/13	 Capacidade Instalada: <b>4.550 kW</b> Potência Instantânea: <b>3.661 kW</b>	 E-Dia: <b>7.3 kWh</b> E-Total: <b>9.0 MWh</b>	 Lucro Diário: <b>R4.89</b> Rendimento Total: <b>R6040.39</b>	 Diário Evitado: <b>0.003 ton</b> Total Evitado: <b>4.100 ton</b>	 Planta Diária: <b>0.022 arvores</b> Planta Total: <b>27.046 arvores</b>
 Data de Criação: 2018/02/12	 Capacidade Instalada: <b>6.500 kW</b> Potência Instantânea: <b>4.580 kW</b>	 E-Dia: <b>11.6 kWh</b> E-Total: <b>12.2 MWh</b>	 Lucro Diário: <b>R9.05</b> Rendimento Total: <b>R9509.14</b>	 Diário Evitado: <b>0.005 ton</b> Total Evitado: <b>5.550 ton</b>	 Planta Diária: <b>0.035 arvores</b> Planta Total: <b>36.574 arvores</b>
 Data de Criação: 2019/04/03	 Capacidade Instalada: <b>6.600 kW</b> Potência Instantânea: <b>3.532 kW</b>	 E-Dia: <b>12.3 kWh</b> E-Total: <b>2.3 MWh</b>	 Lucro Diário: <b>R8.61</b> Rendimento Total: <b>R1580.74</b>	 Diário Evitado: <b>0.006 ton</b> Total Evitado: <b>1.030 ton</b>	 Planta Diária: <b>0.037 arvores</b> Planta Total: <b>6.775 arvores</b>

Fonte: Imagem retirada da plataforma de monitoramento online da PHB, 2019.

Tendo como uma das motivações para o estudo a confiabilidade do sistema de monitoramento das instalações foi realizado uma avaliação dos registros de cada estação simultaneamente no dia 23 de setembro de 2019, ao meio dia. Tratava-se de um dia de céu claro com temperaturas e incidências de irradiação solar são de características tipicamente tropicais para essa época do ano. Após acompanhar o monitoramento em tempo real de cada estação observamos que os inversores das estações P10 e P06 estavam

produzindo menos de um kilowatt cada um enquanto os inversores das outras estações estavam produzindo valores próximos das capacidades dos respectivos sistemas. O que pode ter acontecido então?

Existem algumas possibilidades de interferência no registro da potência instantânea de cada inversor em rede, uma delas é que pode ter entrado alguma nuvem e ter atenuado a irradiação solar instantânea. A segunda hipótese é que pode ter caído a rede do sistema – seja por algum problema do aparelho de monitoramento ou falha de comunicação com a internet do proprietário. Finalmente, pode também ter acontecido alguma pane no sistema instalado e que precisa ser reparado com urgência.

Em contato com a empresa, a mesma informou que no caso de registros atípicos como estes a empresa entra em contato com o proprietário para saber se a estação está gerando energia e se a internet da propriedade está funcionando normalmente. Caso a estação não esteja gerando energia e a internet esteja funcionando bem, a empresa faz uma visita técnica na propriedade e repara o possível problema.

A curto prazo essa informação é muito importante já que o monitoramento serve justamente para tal fim. Já a longo prazo pode gerar problemas em dados de registros anuais, como no caso dos dias e anos atípicos que devem ser desconsiderados na criação de um ano típico. O que acontece é que a energia gerada pelo sistema depende diretamente do registro da potência instantânea do inversor a cada hora, e se uma hora é perdida ou mal registrada por muitas vezes ao longo dos meses, a quantidade de energia total registrada na plataforma estará equivocada. Como no caso desses registros que tendem a não captar a potência instantânea em casos de mal funcionamento e nem sempre condiz com a potência real do sistema naquele momento, pode ser que a plataforma indique um registro de produção energética mais baixo do que realmente produz. No ponto de vista comercial a empresa pode mostrar menor captação e produção de energia do que ela entrega e isso pode fazer com que o possível cliente desista de fazer aquisição de sistemas fotovoltaicos.

## 6. Conclusão

Através da metodologia utilizada nesta dissertação verificou-se:

1. As plantas fotovoltaicas P03 e P02 apresentaram a melhor taxa de produção e desempenho de energia elétrica.
2. A quantidade de painéis pode influenciar na quantidade de produção energética se instalados sob as mesmas condições (como vimos em P07 e P06, que os índices de energia estimada foram maiores em comparação com as outras instalações se desconsiderássemos condições reais de sombreamento ou posicionamento de telhado).
3. Quanto a eficiência energética que informa sobre o aproveitamento energético do proprietário observamos que a P03 é a que teve maior aproveitamento do sistema no prazo de um ano. Isso significa que ela foi a que mais consumiu a eletricidade produzida pelo sistema instalado durante todo o período. Neste caso o sistema poderia contar com um maior número de módulos, pois apesar de contar com uma taxa de produção e desempenho muito boa ainda não se mostrou o suficiente para o consumo local. Diferente da P02 que também mostrou taxas excelentes quanto ao índice de desempenho e produtividade, mas não consumiu mais que produziu.
4. Notamos que a eficiência energética de P07 não foi tão alta quando comparado ao sistema P10 em uma situação simulada de os dois sistemas estarem consumindo a mesma quantidade de energia. Mas isso mostra que se o consumo de cada cliente não fosse considerado, os índices de mérito não teriam muita confiabilidade nem importância, já que não apresentariam dados da situação e necessidade reais de cada instalação. Porque nem todos os sistemas precisam da mesma produtividade energética, o sistema deve produzir o suficiente para atender a própria demanda. Do contrário o investimento pode ser maior que o necessário, aumentando os custos para a empresa e para o cliente ou então o sistema pode não ser o suficiente para atender bem o consumo energético.
5. Por fim, a respeito do monitoramento, sistemas softwares que permitem esse tipo de acompanhamento mesmo que indispensável para o follow up

da empresa nem sempre fornecem informações que também são importantes para a compreensão da viabilidade de investimento e implementação de um sistema de energia fotovoltaica. Além disso, para uma mesma cidade ou região – desde que dentro de um raio de 45 km – é importante fazer comparações e simulações de diferentes situações de sombreamento, quantidade de módulo e consumo energético para conhecer e poder usar tais informações a fim de otimizar os projetos e vendas da empresa e melhorar a satisfação do cliente.

## Referências

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/levantamento-campo>> Acessado em: 05/06/ 2019.

BRAGA, Renata Pereira. Energia Solar Fotovoltaica: fundamentos e aplicações. 2008.

BRITO. M.; SILVA, J. Energia fotovoltaica: conversão de energia solar em eletricidade. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. Artigo publicado na revista O instalador, 2006.

CASTRO, N. J. d. et al. Considerações sobre a Ampliação da Geração Complementar ao Parque Hídrico Brasileiro. Rio de Janeiro: UFRJ/IE/GESEL, Textos de Discussão do Setor Elétrico n 15. 2010.

CRESESB (Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica Sérgio de S. Brito) Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acessado em: 05/06/2019.

DENHOLM, P., MARGOLIS, R.M. Evaluating the limits of solar photovoltaics (PV) in electric power systems utilizing energy storage and other enabling technologies. Energy Policy, 2007.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. Energia e meio ambiente no Brasil. Estudos Avançados [online]. 2007, vol.21, n.59, pp.7-20. ISSN 0103-4014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142007000100003>. Acessado em: 05/06/2019.

MARION, Bill et al. Performance parameters for grid-connected PV systems. In: **Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005**. IEEE, 2005. p. 1601-1606.

MARTINS, F. R., PEREIRA, E. B. e. ECHER, S. M. P. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 26, n. 2, p. 145 - 159, (2004).

MARTINS, F.; PEREIRA, E. Estudo comparativo da confiabilidade de estimativas de irradiação solar para o sudeste brasileiro obtidas a partir de dados de satélite e por interpolação/extrapolação de dados de superfície. Rev. Bras. Geof. vol.29 no.2 São Paulo, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2011000200005>. Acessado em: 05/06/2019.

MELLO, Arthur Durigon et al. Análise de Desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede a partir da Determinação de Índices de Mérito. 2016.

MUNEER, T.; MAUBLEU, S.; ASIF, M. Prospects of solar water heating for textile industry in Pakistan. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 1–23, 2006.

OMS 2014 OMS revela tamanho do impacto que a mudança climática poderá provocar na saúde dos brasileiros Publicado em 01/12/2015. Atualizado em 01/12/2015 Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/oms-revela-tamanho-do-impacto-que-a-mudanca-climatica-podera-provocar-na-saude-dos-brasileiros/>>. Acessado em: 05/06/2019.

ONS, 2015. OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Plano da operação energética 2015.

PEREIRA, Enio Bueno et al. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: Inpe, 2006.

VICHI, F. M., MANSOR M. C. T Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial, São Paulo – SP, Brasil. Quim. Nova, Vol. 32, No. 3, 757-767, 2009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422009000300019>. Acessado em: 05/06/2019.